

ЛОКАЛЬНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ НА ГРАНИЦЕ ТРУБЧАТОЕ ИЗДЕЛИЕ – ДОРН ПРИ ДЕФОРМИРУЮЩЕМ ПРОТЯГИВАНИИ

Стаття присвячена дослідженню розподілу деформації вздовж стінки трубчастого виробу за умов плоского деформівного протягування. За існуючих міркувань локальна деформація головним чином концентрується у пластичній хвилі металу, яка рухається перед фронтальною кромкою пояску інструмента-дорна. У даній публікації розглядається випадок, коли хвиля відсутня – випадок плоскої деформації. Локальна деформація з'ясовується обчисленням подовжки окремих зерен структури металу до і після різних степеней деформації на мікрофотографіях структури у різних точках вздовж товщини стінки. У статті приведені мікрофотографії зразків.

The paper concerns to examination of deformation distribution along the wall of a tube-like article at conditions of the two-dimensional local state of strain for plastic burnishing. According to the adopted point of view the local deformation concentrates mainly in a plastic fold (wave) of metal to move before the frontal face of the burnishing mandrel. The case when lack of the fold, i.e. the two-dimensional state of strain, is observed in the paper. The local deformation is determined by computing elongation of a mass of metal structure grains from microphotographs before and after different rates of strain. The microphotographs are shot at several points along the wall thickness and they are applied in the paper.

Введение.

Ранее описано, что высококачественные результаты процесса пластического протягивания (дорнования) достигаются при малых диаметральных обжатиях. Так, при обжатиях 0,35, 0,45 и 0,65 мм можно получить точность 6 квалитета, а чистота внутренней поверхности, подвергнутой пластическому дорнованию, становится отвечающей чистоте R_a 0,074...0,096 при исходной, полученной развёртыванием R_a 1,0...0,8 [1, 2]. Основной фактор здесь, – малое обжатие на диаметр, – приводит к созданию в обрабатываемой трубе напряженно-деформированного состояния плоской деформации, где отсутствуют перемещения вдоль оси трубы. Эта задача хорошо известна и описана при деформации трубы внутренним давлением, приложенным в каждой точке поверхности. [3, 4]

Деформирующее протягивание в режиме плоской деформации принципиально отличается от традиционного дорнования [5, 6] локальной деформацией слоев, прилегающих к выглаживающему пояску движущегося инструмента – дорна. В обоих случаях в зоне контакта создается объемное напряженное состояние. Этому напряженному состоянию могут соответствовать схемы деформированного состояния: а) объемная $\epsilon_0 > 0$; $\epsilon_r < 0$ и $\epsilon_\theta > 0$ или $\epsilon_0 < 0$, где деформации ϵ_θ , ϵ_r , ϵ_0 – окружные, радиальные или осевые; б) плоская, при которой $\epsilon_\theta > 0$; $\epsilon_r < 0$, $\epsilon_0 = 0$, const.

Если схема деформируемого состояния объемная, то увеличивается или уменьшается длина изделия, и впереди инструмента–дорна перемещается пластическая волна деформируемого металла. Локальная деформация может накапливаться, становясь выше характеристик пластичности, вплоть до разрушения (среза стружки).

Чтобы избежать возникновения такой коллизии и повысить качество протягиваемой поверхности, следует свести локальную деформацию протягивания к плоской деформации (рис. 1) [11], то есть $\epsilon_0 = \text{const}$, и тогда при любом соотношении размеров толстостенной трубы радиальные и окружные деформации распространяются в тело трубы, уменьшаясь по величине в средних слоях стенки до упругих деформаций, которые потом выходят на ее наружную поверхность. В [7] указаны условия, из которых подсчитаны натяги на диаметр, приведенные в начале статьи, обеспечивающие плоскую деформацию.

Создание условий плоской деформации связано с намеренно вызванной неравномерной деформацией в окружном и радиальном направлениях. Неравномерность же пластической деформации вызывает остаточные напряжения после завершения технологического процесса.

Изучение остаточных напряжений [8] вдоль толщины стенки показывает, что при всех примененных обжатиях на диаметр на внутренней поверхности трубы получены сжимающие остаточные напряжения. Окружные сжимающие остаточные напряжения создают благоприятные условия работы изделия при интенсивном нагружении его внутренним давлением, как это наблюдается при автофреттировании.

Микрофотографии поверхности, полученные при наибольшем диаметральном обжатии 0,65 мм [2], показывают, что остаточные напряжения в поверхностном слое достигают предельных значений (1).

$$\sigma_{\text{ост.наиб.}} \leq 1,15\sigma_S, \quad (1)$$

где σ_S – напряжение текучести, [9].

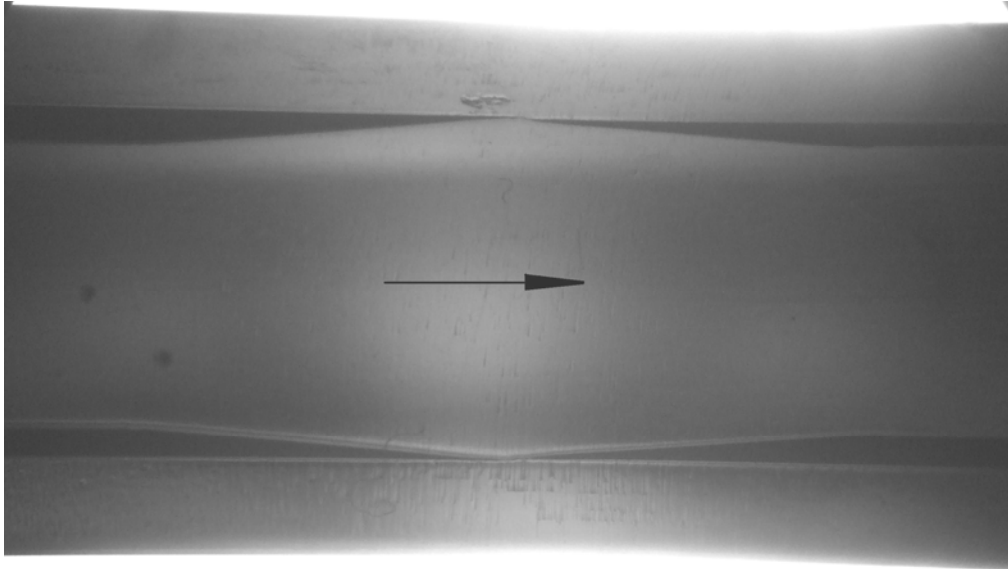


Рис. 1. Продольный разрез дорна и заготовки в процессе деформирующего протягивания для диаметрального обжатия 0,45 мм

Это может приводить к образованию микротрещин по размерам на уровне высоты микронеровностей, соответствующей грубому и тонкому шлифованию. Это также свидетельствует, что локальные деформации в слоях, прилегающих к перемещающемуся дорну, могут достигать величин, соизмеримых с относительным удлинением δ_{10} и больше его при объемном напряженном состоянии применяемой стали 14X17H2 с учетом её упрочнения при пластической деформации, то есть $\epsilon > 15...20\%$.

Попытки охарактеризовать локальную деформацию предпринимались О.А. Розенбергом и др. [6]. Говорится о микроструктуре армко-железа и сталей 20, 45 и У8, но количественные показатели относятся к определению микротвердости и то лишь зерен феррита. Отсутствие кривых упрочнения не позволяет соотнести значения твердости и величины деформаций массива зерен, расположенных в продольном сечении трубы, к тому же из рис. 2. не ясен характер изменения кривых микротвердости. Если на рис. 2.а. большая микротвердость соответствует приконтактным областям, то на рис. 2.б. большая твердость присуща поверхности образцов. Ни в одной серии экспериментов не находились реальные изменения длин зерен и связанные с ними деформации.

В данном исследовании изучается пластическая деформация зерен микроструктуры, вытягиваемых при разных натягах дорнования. Объектом исследования выбран пистолетный ствол калибра 9 мм изготовленный из жаростойкой стали ферритного класса 14X17H2. Продольный разрез дорна и заготовки в процессе деформирующего протягивания, когда дорн находился на середине образца после прекращения процесса, получен электроискровым методом (рис. 3).

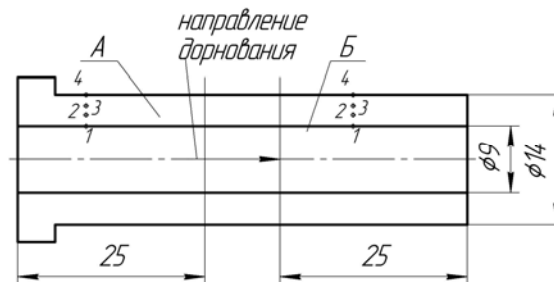


Рис. 3. Схема подготовки образцов для исследования микроструктуры

Определение величины локальных деформаций вблизи поверхности дорна и вдоль толщины стенки определяется по длине зерен микроструктуры, приобретенной в результате холодной пластической деформации.

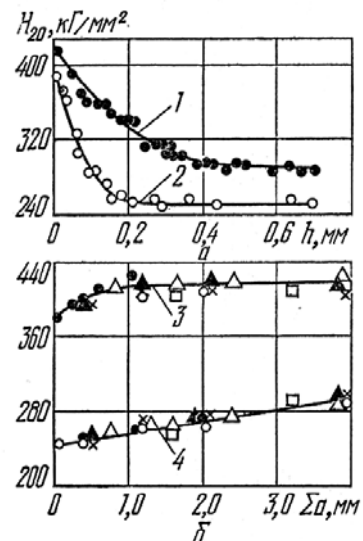


Рис. 2. Изменение микротвердости втулок из стали 45 ($D/d = 1,4$; смазка – сульфурезол): а – по сечению стенок при протягивании с $a = 0,1 \text{ мм}$ до суммарных натягов 4,0 (1) и 0,5 мм (2); б – на поверхности (3) и в сердцевине стенок (4), [6]

Именно вытягивание и переориентировка зерен и образование текстуры позволяет после соответствующей обработки микроструктур определить величины деформаций и напряжений в рассматриваемых точках [10].

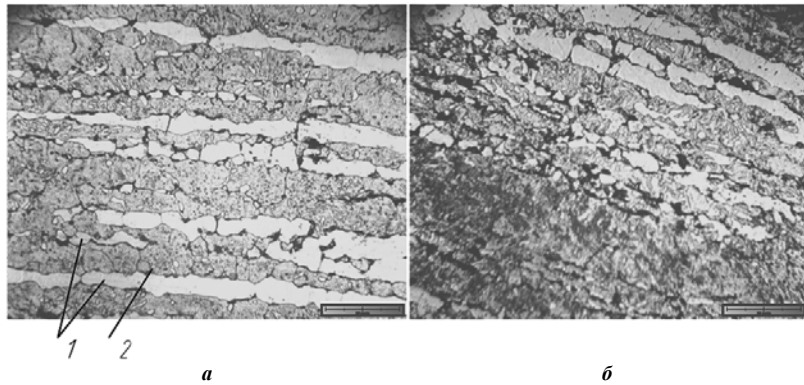


Рис. 4. Микроструктура изделия в различных точках образцов для деформирующего протягивания с диаметральным обжатием 0,45 мм: а – в точке, прилегающей к пояску дорна; б – в недеформированной зоне; 1 – полосы (строчки) легированного феррита; 2 – мелкозернистый перлит



Рис. 5. Запрессованные в бакелит образцы:
а – недеформированная область; б – деформированный участок

В деформированной зоне А (рис. 3.) исследуется микроструктура в 4 точках расположенных в стенке: между точками вблизи образующей отверстия и наружной поверхности. Для суждения об отклонениях в деформированной структуре по сравнению с исходной исследуется также микроструктура в недеформированной части трубы (зона Б). Микроструктуры в точке, прилегающей к пояску дорна, и в недеформированной зоне Б даны на рис. 4.

Заготовка для дорнования – это горячекатанный пруток круглого сечения, изготовленный в соответствии с требованиями ГОСТ 2590-88, термообработанный. Кроме того, перед непосредственным дорнованием образцы отжигались при 800°...850°С с охлаждением вместе с печью. В результате горячей прокатки формируется полосчатая структура, вытянутые светлые полосы которой видны на рис. 4. Полосчатая структура – это следствие процесса рекристаллизации, при которой высокотемпературная фаза – легированный феррит выбирает центрами рекристаллизации вытянутые волокна аморфной примеси. При этом наблюдается волокнистая макроструктура и равноосная микроструктура – то есть волокно состоит из множества равноосных зерен феррита малой величины. Между светлыми полосами расположены более темные участки перлита. Полученный размер зерен соответствует 7...8 баллу зерна, то есть он равен приблизительно 10^{-3} ... 10^{-4} мм.

Деформированная часть ствола (имеющая фланец) и не деформированный конец запрессовываются в бакелит на автоматическом прессе SimpliMet 1000 для горячей запрессовки с водяным охлаждением, тем самым создается плоскость, удобная для шлифовки и полирования микрошлифов. Шлифование и полировка производится на алмазном шлифовальном диске Арех с использованием абразива с размером частиц 75 микрон при скорости вращения 300 об/мин до выведения образца в плоскость бакелитовой матрицы, затем размер абразива уменьшается вдвое. Так же тщательно проводится и полирование, на специальную ткань Техмет Р, наносится абразивная алмазная суспензия METADI Fluid Supreme с размером фракции 9 мкм, затем на ткань TRIDENT с такой же пастой, но размером фракции зерна 3 мкм. Наконец, окончательные результаты достигаются полированием суспензией оксида кремния MASTERMET 2.

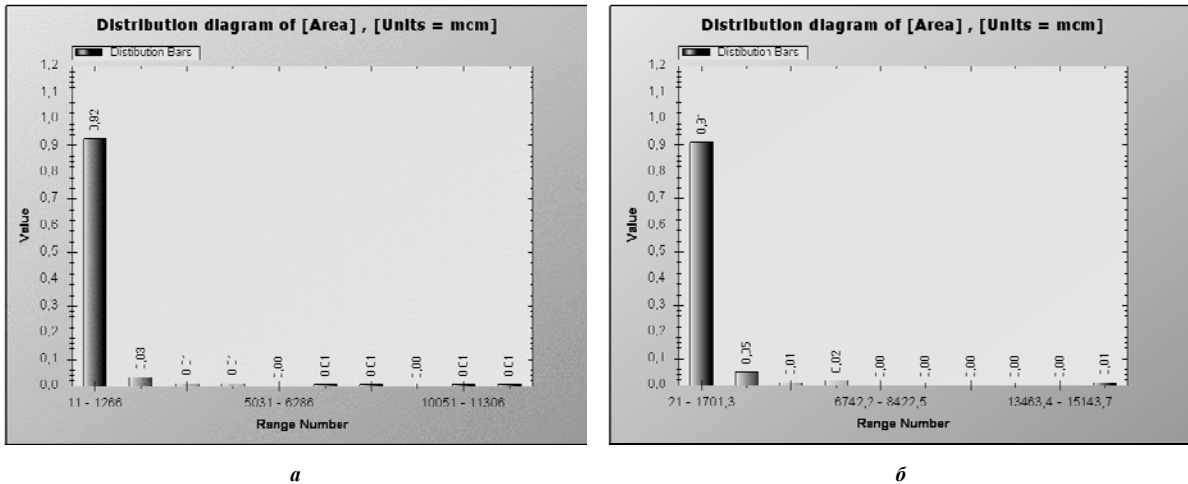


Рис. 6. Блокграммы распределения зерен по площади:
а – после деформации; б – до деформации

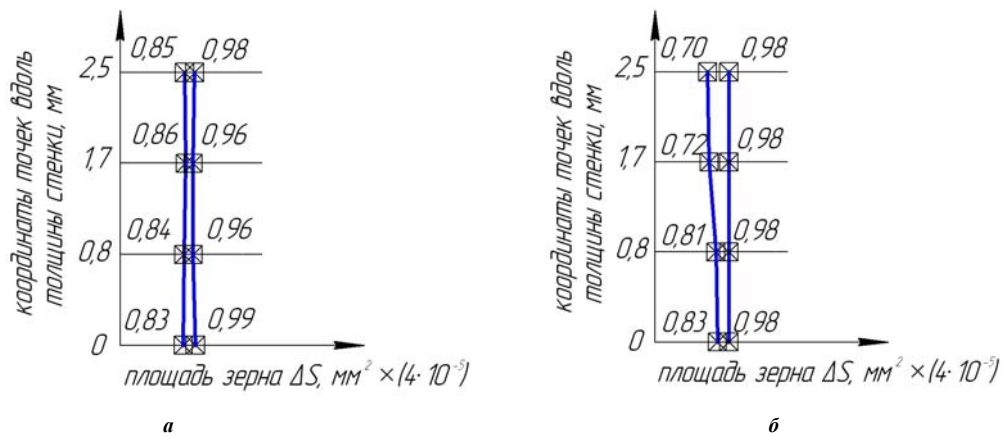


Рис. 7. Среднестатистическая площадь отдельных зерен при:
а – деформированном с натягом 0,35 мм на диаметр образце; б – недеформированном образце,
предназначенном для дорнования с натягом 0,45 мм. Увеличение 500^x

В результате полировочной операции образуется блестящая поверхность, имеющая плоскостность до 0,001 мм, где после травления реагентом, содержащим 50 мл HCl, 3,5 мл HNO₃ и 50 мл H₂O четко проступают границы зерен. Эта очень ответственная операция дублировалась на другой серии экспериментов травителем в составе 10 мл HCl, 20 мл CaSO₄ и 10 мл H₂O. Образцы проанализированы и сфотографированы на металлографическом микроскопе Neophot 21. Полученные микрофотографии обработаны с использованием программы SEO Image Lab v 1,0. Законченные образцы для работы на микроскопе видны на рис. 5.

Обработанная при помощи названной выше программы микроструктура дает блокграммы распределения величины зерен как по площади, так и по наибольшей длине зерен (рис. 6).

На рис.6 по оси абсцисс отложены числа зерен, разделенные на диапазоны, имеющие соответствующие площади, величина которых отложена по оси ординат. 89% зерен имеют одинаковые площади до и после деформации, еще 11 % крупных зерен также одинаковы в обоих случаях. Это означает, что на микрофотографиях представлены почти диаметрально сечения равноосных зерен, площади их до и после деформации одинаковы, это соответствует закону постоянства объема при пластической деформации, и не следует вводить вероятностных коэффициентов при расчетах удлинений зерен, оценивающих их произвольные сечения секущей плоскостью.

Сечения зерен принимаются равновеликими, и теперь обрабатываются блокграммы, соответствующие длинам отдельных зерен (рис. 8).

Заготовка для дорнования – это горячекатанный пруток круглого сечения, изготовленный в соответствии с требованиями ГОСТ 2590-88, термообработанный. Кроме того, перед непосредственным дорнованием образцы отжигались при 800°...850°С с охлаждением вместе с печью. В результате горячей прокатки формируется полосчатая структура, вытянутые светлые полосы которой видны на рис. 4. Полосчатая структура – это следствие процесса рекристаллизации, при которой высокотемпературная фаза – легированный феррит выбирает центрами рекристаллизации вытянутые волокна аморфной примеси. При этом наблюдается волокнистая макроструктура и равноосная микроструктура – то есть волокно состоит из множества равноосных зерен феррита малой величины.

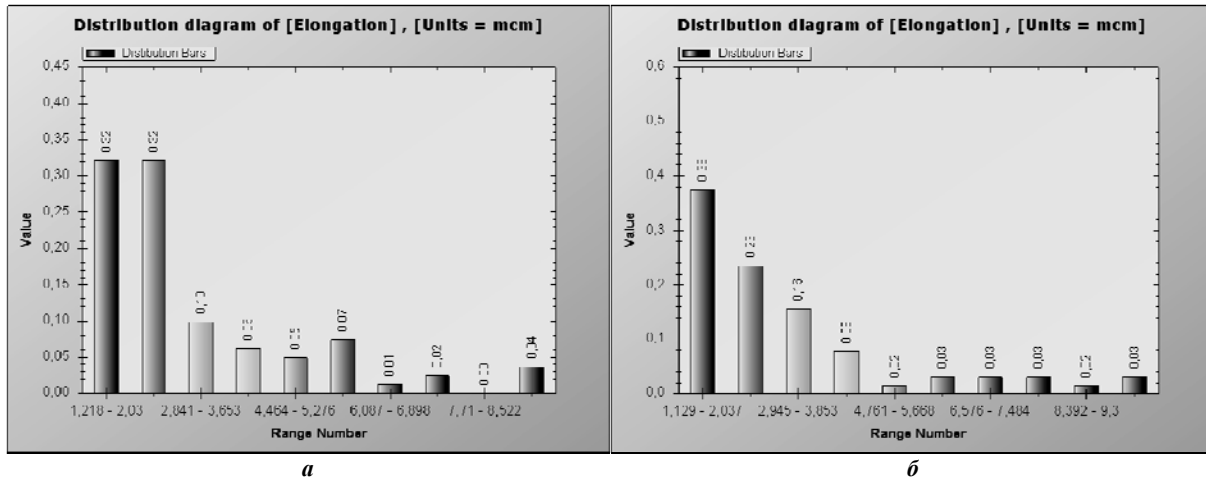


Рис. 8. Блокграми распределения зерен по их наибольшему размеру в недеформированных образцах с натягом 0,65 мм: а – вблизи контактной поверхности; б – в центре образца

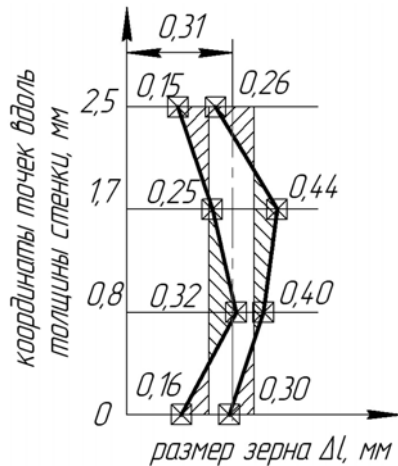


Рис. 9. Распределение наибольших размеров зерен в четырех исследуемых точках ($\times 0,002$) до деформации у образца, подвергнутого впоследствии дорнованию с натягом 0,45 мм

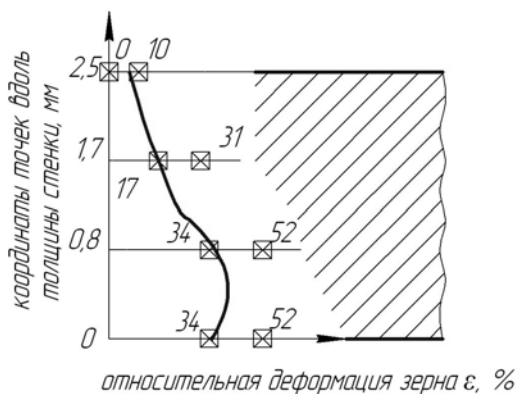


Рис. 10. Кривая распределения локальной относительной деформации вдоль толщины стенки для деформирующего протягивания с натягом 0,45 мм

Между светлыми полосами расположены более темные участки перлита. Полученный размер зерен соответствует 7...8 баллу зерна, то есть он равен приблизительно $10^{-3} \dots 10^{-4}$ мм.

В соответствии с двумя методами обработки микроструктуры получены среднестатистические максимальные размеры зерен в недеформированном образце. Для одной серии экспериментов они представлены на рис. 9.

Математическая обработка кусочно-линейной зависимости по методу наименьших квадратов приводит к средней величине наибольшего размера зерна на микрофотографиях $0,31 \times 0,002$ мм до деформации. Другая серия экспериментов приводит к среднему значению $0,35 \times 0,002$ мм. Эти средние значения исходных длин зерен и приняты в качестве l_0 при подсчетах степеней деформации

$$\varepsilon = \frac{\tilde{l} - \tilde{l}_0}{\tilde{l}_0},$$

где \tilde{l} – среднестатистический наибольший

размер зерна (его длина), получаемая при дорновании с разными натягами, \tilde{l}_0 – среднестатистические значения наибольших размеров зерен до деформации, найденные выше.

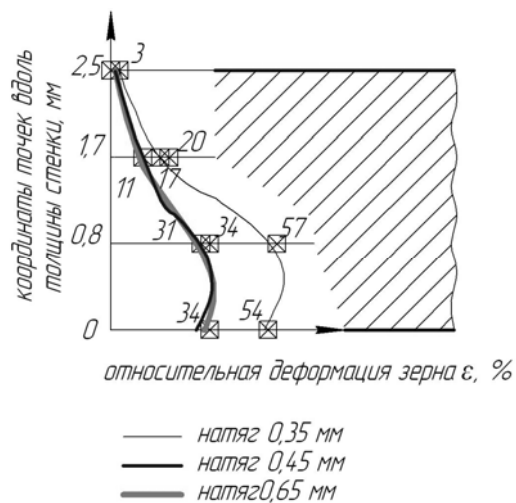


Рис. 11. Кривые распределения локальной относительной деформации вдоль толщины стенки с натягами дорнования: 0,35; 0,45 и 0,65 мм на диаметр

Подсчитанные степени деформации достаточно велики и могут быть использованы лишь для сравнительной оценки дорнования с различными натягами. Если использовать эти сведения, например, для оценки упрочнения, то следовало бы перейти к большим (логарифмическим) деформациям. Расчеты деформаций показывают их значительные величины в приконтактном слое, которые быстро переходят к малым значениям (в пределах точности расчетов) в среднем слое и на наружной поверхности.

Такие величины деформаций возможны без разрушения лишь в случае, если имеет место объемная схема напряженного состояния со значительным влиянием сжимающих напряжений, что соответствует плоской деформации трубы. Из кривых видно, что наибольшие значения деформации в разных режимах достигается на некотором удалении от поверхности контакта трубчатое изделие – дорн, что объясняется влиянием контактного трения, затрудняющего деформацию в месте контакта. Наибольшие локальные деформации наблюдаются в данных экспериментах при наименьших натягах – этим и объясняется наибольшее выглаживающее действие инструмента и наименьшая шероховатость полученной поверхности при натягах 0,35 мм. Это находится в соответствии с законом наименьшего сопротивления при пластической обработке. Объяснение найденных результатов следует провести после подсчета напряжений в очаге деформации.

Выводы.

В проведенном исследовании найдены деформации в локальном очаге пластического протягивания на границе трубчатое изделие – дорн для разных натягов дорнования. Данные результаты соответствуют лишь плоскому деформированному состоянию в условиях небольших натягов на диаметр. Наибольшие деформации в приконтактном слое соответствуют меньшим натягам. Степени деформации достигают своих предельных характеристик пластичности в условиях объемного напряженного состояния.

Список литературы.

1. Яворовский В.Н., Герасимов О.В., Хмара Ю.В. Качество отверстий у изделий большой длины, обработанных деформирующим протягиванием в условиях плоской деформации // Технологические системы, Киев, №2, 2002г. – С.47-50
2. Титов В.А., Яворовский В.Н., Лавренко И.Г., Герасимов О.В. Некоторые особенности формирования параметров качества отверстия при деформирующем протягивании // Технологические системы, Киев, №5, 2002г. – С. 31-36
3. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. М., Изд. иностранной литературы, 1954, - С. 493-541
4. Малинин. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М., Машиностроение, 1975г. – С. 106-112
5. Проскуряков Ю.Г. Дорнование цилиндрических отверстий. – Москва – Свердловск, Машгиз, 1958, С. 17-26
6. Розенберг А.М., Розенберг О.А., Грищенко Э.И., Посвятенко Э.К. Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием. – Киев, «Наукова думка», 1977, С. 28-37.
7. Яворовский В.Н., Герасимов О.В., Хмара Ю.В., Титов В.А. Теоретическое исследование деформации толстостенной трубы большой длины деформирующим протягиванием небольшим радиальным обжатием // Металлургическая и горнорудная промышленность, Днепропетровск, №8-9, 2002г. – С. 366-374.
8. Яворовский В.Н., Герасимов О.В., Титов А.В. Оценка качества изделий большой длины, обработанных деформирующим протягиванием // Вестник НТУ Украины «Киевский политехнический институт», Киев, №46, 2005г. – С. 42-48.
9. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М., Машгиз, 1963. С 105
10. Смирнов-Аляев Г.А., Чикидовский В.П. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. Л., «Машиностроение», 1972г. – С. 211-242
11. Яворовский В.Н., Полищук П.В., Котеленец О.В. Режим плоской деформации при деформирующем протягивании трубчатых изделий большой длины // Вісник НТУ України «Київський політехнічний інститут» Київ, №59, 2010г. – С. 88-91